第 37 卷第 7 期
2017 年 4 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.7
Apr.,2017

DOI: 10.5846/stxb201512142497
黄志刚,肖烨,张国,曹云, 彭保发.气候变化背景下松嫩平原玉米灌溉需水量估算及预测.生态学报,2017,37(7):2368-2381.
Huang Z G, Xiao Y, Zhang G, Cao Y, Peng B F.Estimation and prediction of maize irrigation water requirement based on climate change in Songnen Plain, NE China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(7):2368-2381.

气候变化背景下松嫩平原玉米灌溉需水量估算及预测

黄志刚[1,2,*],肖　烨[1],张　国[3],曹　云[4], 彭保发[1]

1 湖南文理学院, 常德　415000
2 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春　130102
2 中国科学院生态环境研究中心, 北京　100085
4 国家气象中心, 北京　100081

摘要:开展农作物需水规律研究对于干旱半干旱区域旱作物节水灌溉和水分管理实践具有重要意义。以松嫩平原玉米为研究对象,研究玉米生育期需水量规律及灌溉需水量。结果表明:(1) 历史时期和未来气候变化情景下,松嫩平原玉米全生育期和L_{mid}时段灌溉需水量等值线沿西南—东北方向递减,其中全生育期和L_{mid}时段2000s灌溉需水量临界等势线(灌溉需水量为0的等势线)分别比1970s北移70.2 km和53.4 km,全生育期和L_{mid}时段2040s灌溉需水量临界等势线分别比2010s北移30.9 km和55.2 km。(2)历史时期和气候变化情景下玉米全生育期灌溉需水量随年代呈波动增加趋势,其中前者以29.1 mm/(10a)速度增加,后者以17.5 mm/(10a)速度增加。(3)未来温度和降雨量变化对玉米需水量的贡献率为波动上升趋势,与1970s相比,2000s温度和降雨量变化对玉米需水量的贡献率为22.1%,增加6.8亿m^3灌溉水量;2040s温度和降雨量变化对玉米需水量的贡献率为38.3%,增加12.6亿m^3灌溉水量。

关键词:气候变化;有效降雨量;玉米需水量;灌溉需水量;气候变化贡献率

Estimation and prediction of maize irrigation water requirement based on climate change in Songnen Plain, NE China

HUANG Zhigang[1,2,*], XIAO Ye[1], ZHANG Guo[3], CAO Yun[4], PENG Baofa[1]

1 *Hunan University of Arts and Science*, *Changde* 415000, *China*
2 *Northeast Institute of Geography and Agroecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130102, *China*
3 *Research Center for Eco-Environmental Sciences*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100085, *China*
4 *National Meteorological Center of China*, *Beijing* 100081, *China*

Abstract: It is important to study crop water requirement rule for water-saving irrigation and water regulation management of dry land crops in arid and semi-arid regions. In this study, the maize water requirement was estimated by means of McCloud model and Penman-Monteith model, and the amount of irrigation water in maize field was estimated by water balance approach in Songnen Plain, NE China. The main results are shown below: (1) both in historical period and projected climate change scenario, the maize irrigation water amount contour lines during the whole growth period and L_{mid} periods decreased along southwest to northeast geographically, and the same irrigation water amount contour line moved north with the progression of decades. Compared with 1970s, the zero equipotential line of irrigation water requirement during the whole growth period and L_{mid} period in 2000s moved to north by 70.2 km and 53.4 km, respectively. Compared with 2010s, the zero equipotential line of irrigation water requirement during the whole growth and L_{mid} periods in 2040s moved to north

基金项目:国家自然科学基金项目(31100320); 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2010CB428404); 河南省教育厅高校重点科研项目(15A180052);洞庭湖生态经济区建设与发展湖南省协同创新中心联合支助

收稿日期:2015-12-14;　　**网络出版日期**:2016-08-30

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: huangzhigang03@ sina.com

by 30.9 km and 55.2 km, respectively. (2) The maize irrigation water requirement during the whole growth period increased volatility coupled with the progression of decades both in historical conditions and in projected climate change scenarios, and the rate of the increase was 29.1 mm/(10a) in historical period and 17.5 mm/(10a) in projected climate change scenarios. (3) Compared with 1970s, contribution of climate change to the maize irrigation water requirement was 22.1% in 2000s and 38.3% in 2040s, namely an increase of 6.8×10^8 m^3 in irrigation water requirement in 2000s and an increase of 12.6×10^8 m^3 in irrigation water requirement in 2040s.

Key Words: climate change; effective rainfall; maize water requirement; irrigation water requirement; contribution rate of climate change

IPCC 第 4 次评估报告认为全球气候变化已是不争的事实,将对全球和区域水资源安全构成严重威胁[1],气候变化通过改变降雨量的时空分布来影响干旱半干旱区域农业生产[2-4]。近年来世界范围的气候异常给许多国家的粮食生产和水资源带来了严重影响[5-8],能否正确预测气候异常变化和这些变化带来的影响已成为当前迫切需要解决的重大问题[9-11]。作物需水量是农业用水的主要组成部分,通过蒸散计算作物需水量是一个复杂的物理过程和生物过程,成为许多国际性项目的重要研究内容[12-15]。学者们多借助气候模型模拟未来气象参数变化序列(主要是温度和降水量)来研究未来气候变化对农作物需水量的影响[13,16]。国际上一些关于气候变化对农作物需水量及灌溉需水量的研究认为,未来气候变化情景下作物灌溉需水量将有所增加,增加幅度为 10%—30%,但是区域差异较大[17-22]。

松嫩平原属于全球气候变化的敏感区,是我国最好的一熟制作物种植区和国家重要的商品粮基地之一,其农田面积占总土地面积的 50%以上,占全国农田总面积的 7.8%,属于典型的农田生态系统生产力区域,对于保障国家粮食安全具有举足轻重的地位[23-24]。近年来,松嫩平原春旱和秋旱发生频率有所增加,其强度也呈加剧的趋势[25,26]。玉米是松嫩平原的主要粮食作物,但对于松嫩平原玉米生育期内降雨利用效率、需水特性及气候因素相关性等研究报道较少。因此,开展玉米需水规律的研究对于松嫩平原玉米节水灌溉管理和雨养农业的水分调控,提高玉米农田水分利用效率具有重要意义。本文利用松嫩平原及周边区域 34 个国家标准气象站点 1970—2009 年气象数据,分析了近 40 年玉米生长期内特别是需水关键期的水分盈亏和时空分布规律,探讨气候变化对玉米需水量和灌溉需水量的影响,为松嫩平原玉米合理布局及雨养农业水分管理提供基础数据和理论依据。

1　研究区域与方法

1.1　研究区域概况

松嫩平原地处中国湿润季风区与内陆干旱区之间的过渡带,地理位置(121°38′—128°33′ E、42° 49′—49° 12′ N),总面积 18.95×10^4 km^2(图 1)。松嫩平原属半干旱半湿润气候,是气候变化敏感区,年平均气温为 0—5℃,其中 1 月平均气温-16—-26℃,7 月平均气温 21—23℃;全年降水量 400—600 mm,自东向西逐渐减少;年均日照时数 2600—2900 h,年总辐射量 4500—5300 MJ/m^2;无霜期日数 115—160 d,≥10℃活动积温 2300—3100℃,自南向北递减[15]。

1.2　研究方法

1.2.1　数据来源

本文所用气象资料为松嫩平原 20 个气象站及周边 14 个气象站 1970—2009 年逐日大气压、平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、平均风速、相对湿度观测数据,以上数据均来源于国家气象信息中心中国气象科学数据共享服务网。松嫩平原土地利用图(1975、1985、1996、2005)来源于中国科学院东北地理与农业生态研究所遥感与地理信息研究中心。玉米生育期观测资料来源于中国科学院东北地理与农业生态研究所德惠农业生态试验站。

1.2.2 松嫩平原作物系数估算

FAO 56 指南推荐的基础作物系数(K_c)为土壤表层干燥但根层水分含量仍能完全维持作物蒸腾时的作物需水量(ET_c)与潜在蒸散量(ET_0)的比值。根据作物发育特点,把生育期划分为生育早期(L_{ini} period)、发育期(L_{dev} period)、生育中期(L_{mid} pe riod)、生育后期(L_{end} period)4 个阶段,每个阶段持续的时间不等。由于 K_c 主要考虑作物特性和个别气象因素,从而使得 K_c 标准值在不同地点、不同气候区经修订后能互相通用。K_c 修正值 K_{cm} 由公式 1—公式 2)估算[27]:

$$K_{ci} = K_{cprew} + \left[\frac{i - \sum(L_{prew})}{L_{stage}}\right](K_{cnext} - K_{cprew}) \quad (1)$$

$$K_{cm} = K_c + 0.04 \times (U_2 - 2) - 0.004 \times (RH_{min} - 45) \times (h/3)^{0.3} \quad (2)$$

式中,K_{ci} 为玉米生育期第 i 天的作物系数;K_{cprew} 为第 i 天所在生育时期的前一个生育时期的 K_c 值;K_{cnext} 为第 i 天所在生育时期的后一个生育时期的 K_c 值;L_{stage} 为第 i 天所在生育时期历时天数(d);$\sum(L_{stage})$ 为第 i 天所在生育时期之前所有生育时期历时天数之和(d);U_2 为作物生长中、晚期 2 m 高处日风速平均值(m/s);RH_{min} 为作物生长中、晚期 20%—80% 的最低相对温度平均值;h 为作物生长中、晚期日最低相对湿度在 20%—80%情况下的植株平均高度(m)。

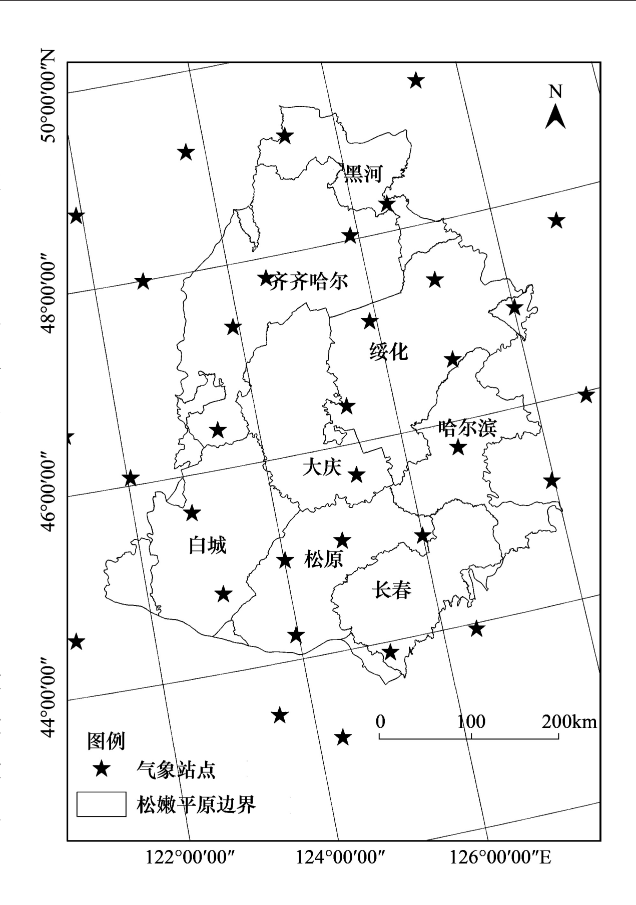


图 1 松嫩平原地理位置及行政区划

Fig.1 Location and administration maps of Songnen plain

根据上述作物系数估算方法(公式 1—公式 2),计算松嫩平原及周边 34 个气象台站玉米生育期内逐日作物系数,统计得到不同生育时段作物系数均值。应用 GIS 软件 Kriging 插值法对 20 个气象台站玉米不同生育时段作物系数进行空间插值,得到玉米作物系数空间分布。

1.2.3 过去 40 年松嫩平原玉米需水量估算

潜在蒸散量(ET_0)是指从一个标准的"参照表面"发生的蒸散量。FAO 定义了参照表面为高度均匀、生长旺盛、完全覆盖土表并且供水充足的草地,其高度为 12 cm,表面阻力为 70 s/m,反射率为 0.23。根据定义的标准参照表面,FAO 提出了计算潜在蒸散量的 FAO 56 Penman-Monteith 公式[28]。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T + 273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

$$ET_c = K_{cm} \cdot ET_0 \quad (4)$$

式中,ET_0为潜在蒸散量(mm/d);R_n为冠层表面净辐射(MJ m^{-2} d^{-1});G 为土壤热通量(MJ m^{-2} d^{-1});T 为日平均气温(℃);u 为 2 m 高处日平均风速(m/s);e_s为饱和水汽压(kPa);e_a为实际水汽压(kPa);e_s-e_a为饱和水汽压差(kPa);Δ 为水汽压曲线斜率(kPa/℃);γ 为湿度计常数(kPa/℃)。松嫩平原玉米种植除播种时喷洒少量水湿润土壤外,整个生育期不灌水,基本上属于雨养农业。在日尺度或者年尺度范围内,土壤热通量变化量很小,故本文中忽略土壤热通量,认为土壤热通量变化值为 0。

在不考虑玉米品种变化的情况下,根据作物系数法(公式 4)估算松嫩平原及周边 34 个气象台站玉米生育期内日需水量,统计得到玉米不同生育时段需水量。分年代统计 34 个气象台站玉米生育期需水量,应用

GIS 软件 Kriging 插值法对玉米生育期内需水量进行空间插值,得到玉米需水量年代际空间分布。

1.2.4　未来 40 年松嫩平原玉米需水量估算

气候变化情景选取国家气象中心提供的区域气候模式 CMIP5_Rcp 4.5 排放情景数据集(0.5°×0.5°),即 2100 年太阳辐射强迫上升至 4.5 W/m。该气候变化情景只提供了月均温度、月均最低、最高温度及月均降雨量数据。根据松嫩平原经纬度坐标范围,提取了 81 个格点数据。未来 40 年松嫩平原玉米需水量估算过程如下:1)建立历史时期(1961—2005 年)实测月均温度数据与国家气象中心提供的区域气候模式月均温度之间的统计关系,用以校正预估的未来月均温度;2)建立历史时期(1961—2005 年)实测月均降雨量数据与国家气象中心提供的区域气候模式月均降雨量之间的统计关系,用以校正预估的未来月均降雨量;3)采用 McCloud 模型[29]基于气温估算历史时期(1970—2009 年)潜在蒸发量(公式 5),同时采用 P-M 模型估算历史时期(1970—2009 年)潜在蒸散量,建立 P-M 模型与 McCloud 模型估算的潜在蒸散量线性回归模型(公式 6)。

$$ET_{Mc} = 25.4KW^{(1.8T)} \tag{5}$$

$$ET_{P\text{-}M} = a \cdot ET_{Mc} + b \tag{6}$$

式中,ET_{Mc}为潜在蒸散量(mm);$K=0.01$;$W=1.07$;T 为月平均温度(℃)。

4)应用 McCloud 模型估算未来 40 年玉米生育期内(5—9 月)潜在蒸散量,应用公式(6)换算成 P-M 模型估算的潜在蒸散量。在不考虑玉米品种变化的情况下,根据作物系数法(公式 4)估算松嫩平原未来 40 年 34 个气象台站玉米生育期内月均需水量,统计得到玉米不同生育时段需水量。分年代统计未来 40 年 34 个气象台站玉米生育期内需水量,应用 GIS 软件 Kriging 插值法对玉米生育期内需水量进行空间插值,得到玉米需水量年代际空间分布。

1.2.5　玉米灌溉需水量

松嫩平原玉米种植基本上靠雨养。有效降雨量采用目前应用最广泛的美国农业部水土保持司推荐的方法计算[30-31]:

$$\begin{cases} P_{eff} = P_{month} \times (125 - 0.2 \times P_{month})/125 & P_{month} \leqslant 250\text{mm} \\ P_{eff} = 125 + 0.1 \times P_{month} & P_{month} > 250\text{mm} \end{cases} \tag{7}$$

式中,P_{eff}为月有效降雨量(mm/month),P_{month}为月总降雨量(mm/month)。

玉米的灌溉需水量等于玉米生育期作物需水量与有效降雨量的差值,再加上播种时洒水量和田间渗漏量。根据德惠农业生态试验站多年试验数据,播种时洒水量一般在 5—6 $m^3/667m^2$,换算成需水量约为 8 mm;遇极端干旱季节需要灌溉时,一般采用软管喷灌,田间无积水,故田间渗漏量忽略不计。所以,玉米生育期灌溉需水量(I_s)公式及不同生育时段灌溉需水量(I_{s_i})可分别表达如下:

$$I_s = \sum_{i=1}^{n=4} ET_c - \sum_{i=1}^{n=4} P_{eff} + 8 \tag{8}$$

$$I_{s_dn} = \sum_{i=1}^{i=dn} ET_{c_dn} - \sum_{i=1}^{i=dn} P_{eff_dn} \tag{9}$$

式中,n 为不同生育时段,d 为不同生育时段持续天数。

以松嫩平原 20 个国家气象台站估算的玉米灌溉需水量进行 kriging 插值得到过去 40 年玉米灌溉需水量空间分布图,然后以相应年代的玉米空间分布图截取过去不同年代玉米灌溉需水量空间分布图,取其均值作为该年代玉米灌溉需水量均值;以截取的 81 个格点估算的玉米灌溉需水量进行 kriging 插值得到未来 40 年玉米灌溉需水量空间分布图,然后以 2005 年的玉米空间分布图截取未来不同年代玉米灌溉需水量空间分布图,取其均值作为该年代玉米灌溉需水量均值。应用 ArcGIS 软件 buffer analysis 模块计算等高线间平均距离。

1.2.6　气候变化对玉米需水量贡献率计算

以 1970s 玉米需水量为基准,计算气候变化对松嫩平原玉米需水量贡献率。作物需水量(WR)与潜在蒸散量及作物系数相关,在不考虑小气候影响下与作物种植面积无关。假定玉米品种和栽培技术不变,则玉米需水量的增加来源于气候变化。气候变化对玉米需水量贡献率(RCC)可采用公式(10)计算,气候变化增加

灌溉需水量(IWI_{cc})可采用公式(11)计算。式中,WR_i为 i 年代玉米需水量(mm);S_i为 i 年代玉米种植面积(10^4 hm^2);IWI_i为 i 年代灌溉需水量(10^8 m^3)。

$$CRCC_i = \frac{WR_i - WR_{70s}}{WR_{70s}} \times 100\% \tag{10}$$

$$IWI_{cci} = CRCC_i \times S_i \times IWI_i \tag{11}$$

2 结果与分析

2.1 气象要素变化特征

整理松嫩平原过去 40 年气象要素数据,应用 ArcGIS 空间信息系统,分析气象要素时间空间变化规律。空间上,降水量沿西南—东北、南—北方向递增,平均气温和日照时数沿西南—东北、南—北方向递减;时间上,降雨量以 3.63 mm/(10a)的速率减少,平均气温以 0.16 ℃/(10a)的速率增加,日照时数以 16.3 h/(10a)年的速率减少。

2.2 玉米作物系数

松嫩平原种植一季玉米,根据中国科学院东北地理与农业生态研究所德惠农业生态试验站近 10 年玉米栽培生育期观测记录数据,松嫩平原玉米种植制度年际间变化较为稳定。玉米种植一般在每年 5 月 1 日前后播种,9 月 20 日左右收割,生育期为 153 d。结合 FAO 56 推荐的玉米生育时段历时的划分,本文对松嫩平原玉米生育时段和相应历时做了划分(表 1)。发育期与发育中期修正之后的作物系数略低于推荐值,其原因在于中国东北地区建立了较完善的防护林,风速较低;生育后期修正之后的作物系数略低于推荐值,其原因在于中国东北地区地处高纬度,该时段温度下降幅度大且相对湿度低。

表 1 松嫩平原玉米(中晚熟品种/组合)生育时期划分级作物系数

Table 1 Crop coefficient in different growth periods

生育时期 Growth period	生育早期 L_{ini} period	发育期 L_{dev} period	生育中期 L_{mid} period	生育后期 L_{end} period
日期 Date	05-01—05-31	06-01—07-10	07-11—08-20	08-21—09-21
历时 Duration/d	31	40	51	31
K_c	0.30	0.30—1.20	1.20	1.20—0.60
K_{cm}	0.30	0.36—1.18 (0.81)	1.18	1.18—0.52 (0.87)

表中括号内数值为该生育时段均值

2.3 潜在蒸散量校准

分别采用 McCloud 模型和 Penman-Monteith 模型计算松嫩平原 20 个国家气象台站过去 40 年月均潜在蒸散量,然后建立 McCloud 模型(y)和 Penman-Monteith 模型(x)之间的数量线性模型(表 2)。作物非生长季节(10 月—次年 4 月)线性模型决定系数高于作物生长季节(5—9 月),模型决定系数(R^2)变化范围为 0.530—0.950,表现出显著相关性。故可用该方法估算气候变化情景下作物潜在蒸散量。

2.4 松嫩平原玉米全生育期灌溉需水量变化

2.4.1 过去 40 年玉米全生育期灌溉需水量时间变化

过去 40 年,气候变化对松嫩平原玉米水分需求产生影响,松嫩平原玉米全生育期需水量及灌溉需水量均呈波动增加趋势(图 2),其中需水量以 23.0 mm/(10a)的速率增长,灌溉需水量以 29.1 mm/(10a)的速率增长,比需水量增长速率高 26.5%。其原因在于有效降雨量呈波动下降趋势,以 6.1 mm/(10a)的速率减少。

2.4.2 过去 40 年玉米全生育期灌溉需水量空间变化

以松嫩平原 20 个国家气象台站估算的玉米全生育期灌溉需水量在相应年代玉米空间分布图上进行 Kriging 插值,结果如图 3 所示,图中等势线值为负数的区域,表示该区域种植玉米不需要额外灌溉水,降雨量

能够满足玉米生育期需水量,下同。过去 40 年,气候变化对松嫩平原玉米全生育期灌溉需水量空间变化产生影响。在空间变化上,灌溉需水量等值线沿西南—东北方向递减;同一灌溉需水量等值线北移,与 1970s 相比,2000s 灌溉需水量临界等势线(灌溉需水量为 0 的等势线)北移 70.2 km。在时间变化上,灌溉需水量随年代增加呈显著增加趋势。1970s 灌溉需水量为 0—100 mm,2000s 灌溉需水量为 0—200 mm,为 1970s 灌溉需水量的 2 倍。

表 2　历史时期 McCloud 模型和 P-M 模型估算月均潜在蒸散线性模型

Table 2　Linear model of monthly potential ET_0 evaluated by McCloud model and P-M model

月份 Month	线性模型 Linear model (n=800)	R^2(P<0.05)	月份 Month	线性模型 Linear model (n=800)	R^2(P<0.05)
1	$y = 0.056x - 0.032$	0.950	8	$y = 1.111x + 9.877$	0.812
2	$y = 0.056x + 0.124$	0.915	9	$y = 0.503x + 4.853$	0.596
3	$y = 0.073x + 1.166$	0.753	10	$y = 0.229x - 0.159$	0.530
4	$y = 0.158x + 2.639$	0.815	11	$y = 0.108x - 0.055$	0.729
5	$y = 0.348x + 3.646$	0.741	12	$y = 0.072x - 0.097$	0.930
6	$y = 0.748x + 11.74$	0.751	年均值 Annual mean	$y = 0.517x + 48.05$	0.884
7	$y = 1.366x + 7.294$	0.613			

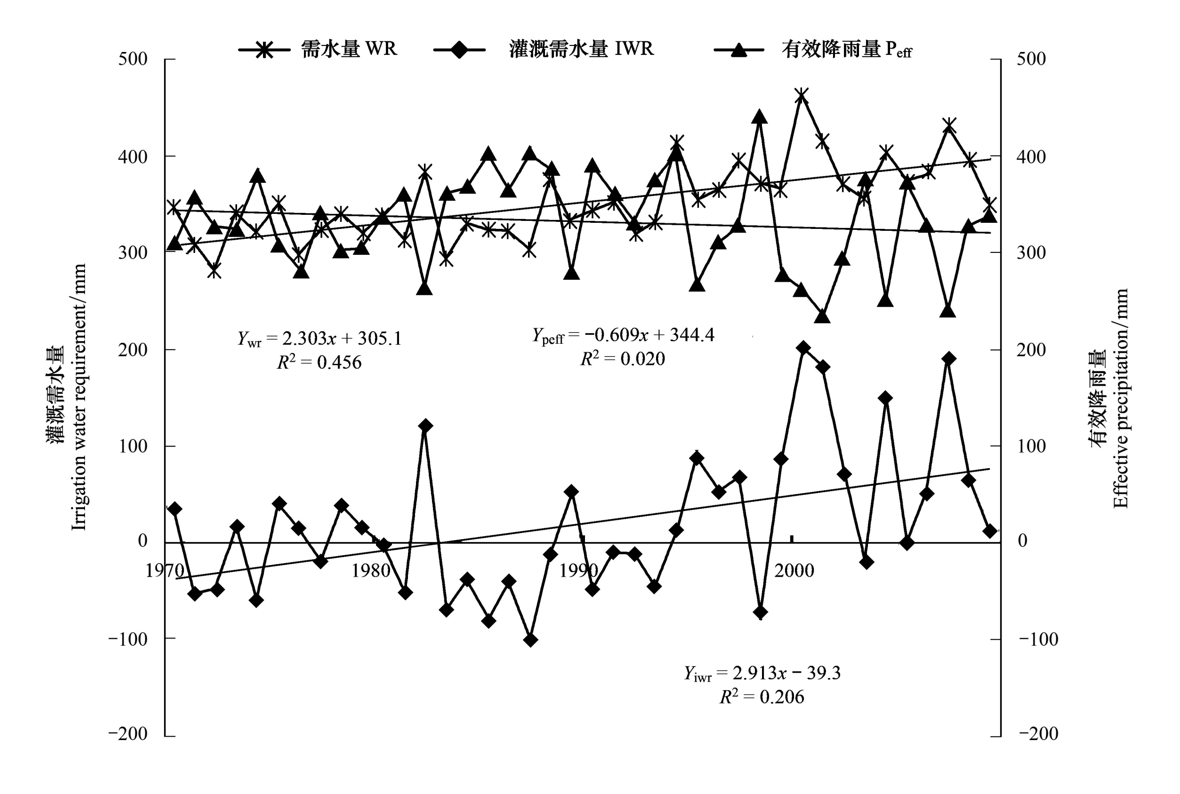


图 2　过去 40a 玉米全生育期灌溉需水量时间变化

Fig.2　Temporal variation of maize irrigation water requirement during the whole growth period in the past 40 years

2.4.3　未来 40 年玉米全生育期灌溉需水量时间变化

未来 40 年松嫩平原玉米全生育期需水量及灌溉需水量均呈波动增加趋势(图 4),其中需水量以 23.0 mm/(10a)的速率增长;灌溉需水量以 17.5 mm/(10a)的速率增长,比需水量增长速率低 23.9%。其原因在于有效降雨量呈波动上升趋势,以 5.5 mm/(10a)的速率增长,缓解了玉米需水量增加带来的水分需求。

2.4.4　未来 40 年玉米全生育期灌溉需水量空间变化

以松嫩平原 81 个格点估算的玉米全生育期灌溉需水量在 2005 年玉米空间分布图上进行 Kriging 插值,

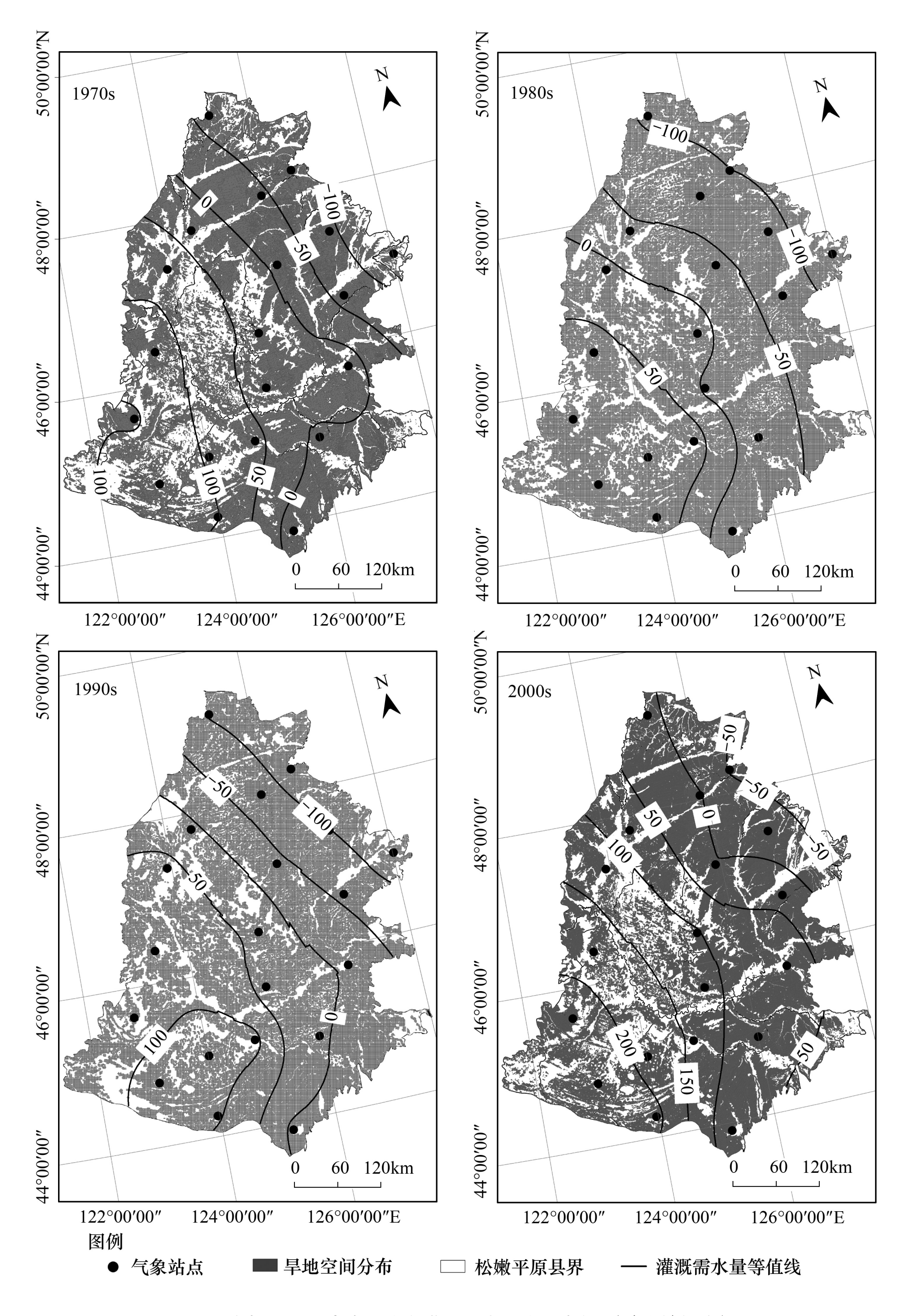


图 3　过去 40 a 玉米全生育期灌溉需水量空间变化(类似图例下同)

Fig.3　Spatial variation of maize irrigation water requirement during the whole growth period in the past 40 years (The similar Legend is the same below)

结果如图 5 所示。未来 40 年,虽然气候变化对松嫩平原玉米全生育期灌溉需水量空间变化影响相对较小,但是总的来说还是增加玉米灌溉需水量。在空间变化上,灌溉需水量等值线沿西南—东北方向递减。同一灌溉需水量等值线北移,但北移幅度较过去 40 年小;与 2010s 相比,2040s 灌溉需水量临界等势线(灌溉需水量为 0 的等势线)北移 30.9 km。在时间变化上,灌溉需水量随年代增加呈增加趋势。2010s 灌溉需水量为 0—200 mm,2040s 灌溉需水量为 0—250 mm,为 2010s 灌溉需水量的 1.25 倍。说明未来气候变化对松嫩平原玉米水分需求的影响将相对减弱。

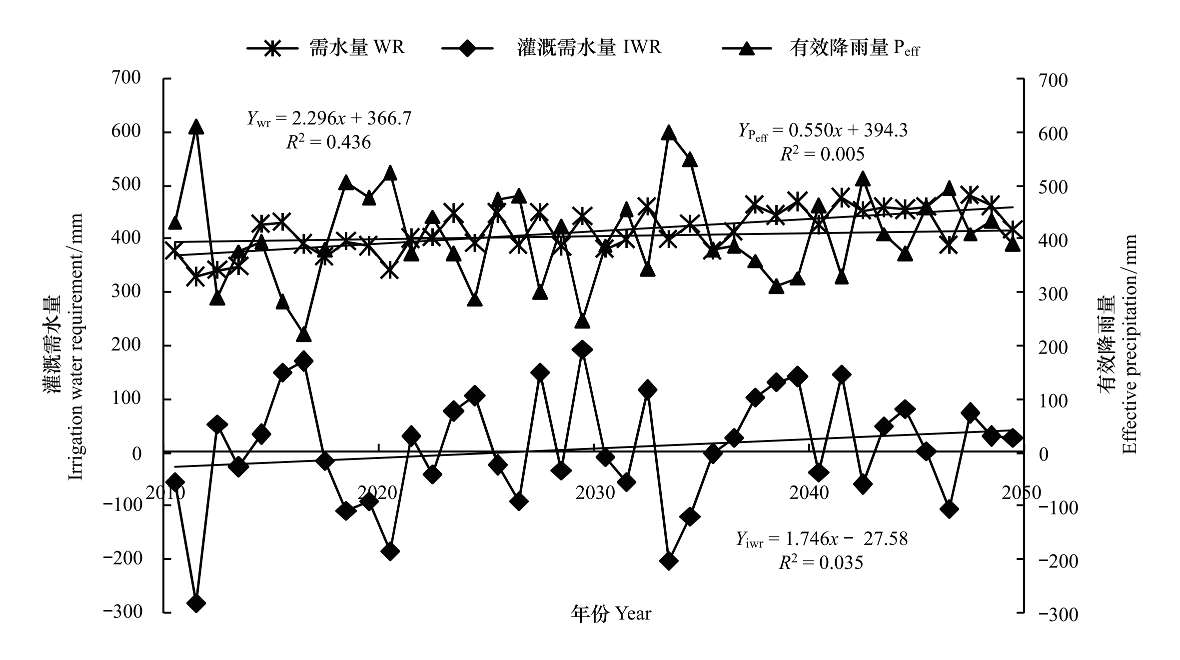


图 4　未来 40 a 玉米全生育期灌溉需水量时间变化

Fig.4　Temporal variation of maize irrigation water requirement during the whole growth period in the future 40 years

2.5　玉米不同生育时段灌溉需水量变化

2.5.1　过去 40 年玉米不同生育时段需水量时间变化

统计整理过去 40 年松嫩平原玉米不同生育时段灌溉需水量(图 6),4 个生育时段玉米需水量随着年代际均呈显著增加趋势,说明过去 40 年气候变化使得松嫩平原呈变旱的趋势。L_{ini}时段灌溉需水量为 33.7—43.1 mm,日均值为 1.2 mm/d;L_{dev}时段灌溉需水量为 102.8—127.2 mm,日均值为 2.8 mm/d;L_{mid}时段灌溉需水量为 121.7—141.9 mm,日均值为 2.6 mm/d;L_{end}时段灌溉需水量为 64.6—81.9 mm,日均值为 2.3 mm/d。L_{dev}时段日均需水量稍高于 L_{mid}时段,是因为该时段是玉米营养生长期,又是雨季的开始,较充沛的降雨,早期土壤蒸发作用强烈,后期植株蒸腾作用强烈,导致该时段需水量高于以植株蒸腾作用为主的 L_{mid}时段。

2.5.2　过去 40 年玉米 L_{mid}时段灌溉需水量空间变化

L_{mid}时段是玉米生长的关键时期,以松嫩平原 20 个国家气象台站估算的玉米 L_{mid}时段灌溉需水量在相应年代玉米空间分布图上进行 Kriging 插值,结果如图 7 所示。过去 40 年,气候变化对松嫩平原玉米 L_{mid}时段灌溉需水量空间变化影响较小,说明 L_{mid}时段松嫩平原玉米需水量与降雨量相对较稳定。在空间变化上,L_{mid}时段灌溉需水量等值线沿西南—东北方向递减;同一灌溉需水量等值线北移,与 1970s 相比,2000s 灌溉需水量临界等势线(灌溉需水量为 0 的等势线)北移 53.4 km。在时间变化上,灌溉需水量随年代增加呈显著增加趋势。1970s 灌溉需水量为 0—50 mm,2000s 灌溉需水量为 0—80 mm,为 1970s 灌溉需水量的 1.6 倍。

2.5.3　未来 40 年玉米不同生育时段灌溉需水量时间变化

统计整理未来 40 年松嫩平原玉米不同生育时段灌溉需水量(图 8),L_{ini}时段灌溉需水量为 35.4—44.8 mm,日均值为 1.3 mm/d;L_{dev}时段灌溉需水量为 110.5—129.2 mm,日均值为 3.0 mm/d;L_{mid}时段灌溉需水量为 149.1—167.9 mm,日均值为 3.2 mm/d;L_{end}时段灌溉需水量为 83.2—105.0 mm,日均值为 3.0 mm/d。气候变化背景下,4 个时段玉米需水量随年代际显著增加,说明未来气候变化对 4 个时段均有不同程度的影响。未来 40 年 4 个时段玉米需水量均高于过去 40 年相应时段玉米需水量,其原因一方面在于未来气温升高增加潜在蒸散量;另一方面未来降雨量增加,增加了可蒸散水分。

2.5.4　未来 40 年玉米 L_{mid}时段灌溉需水量空间变化

以松嫩平原 81 个格点估算的玉米 L_{mid}时段灌溉需水量在 2005 年玉米空间分布图上进行 Kriging 插值,结

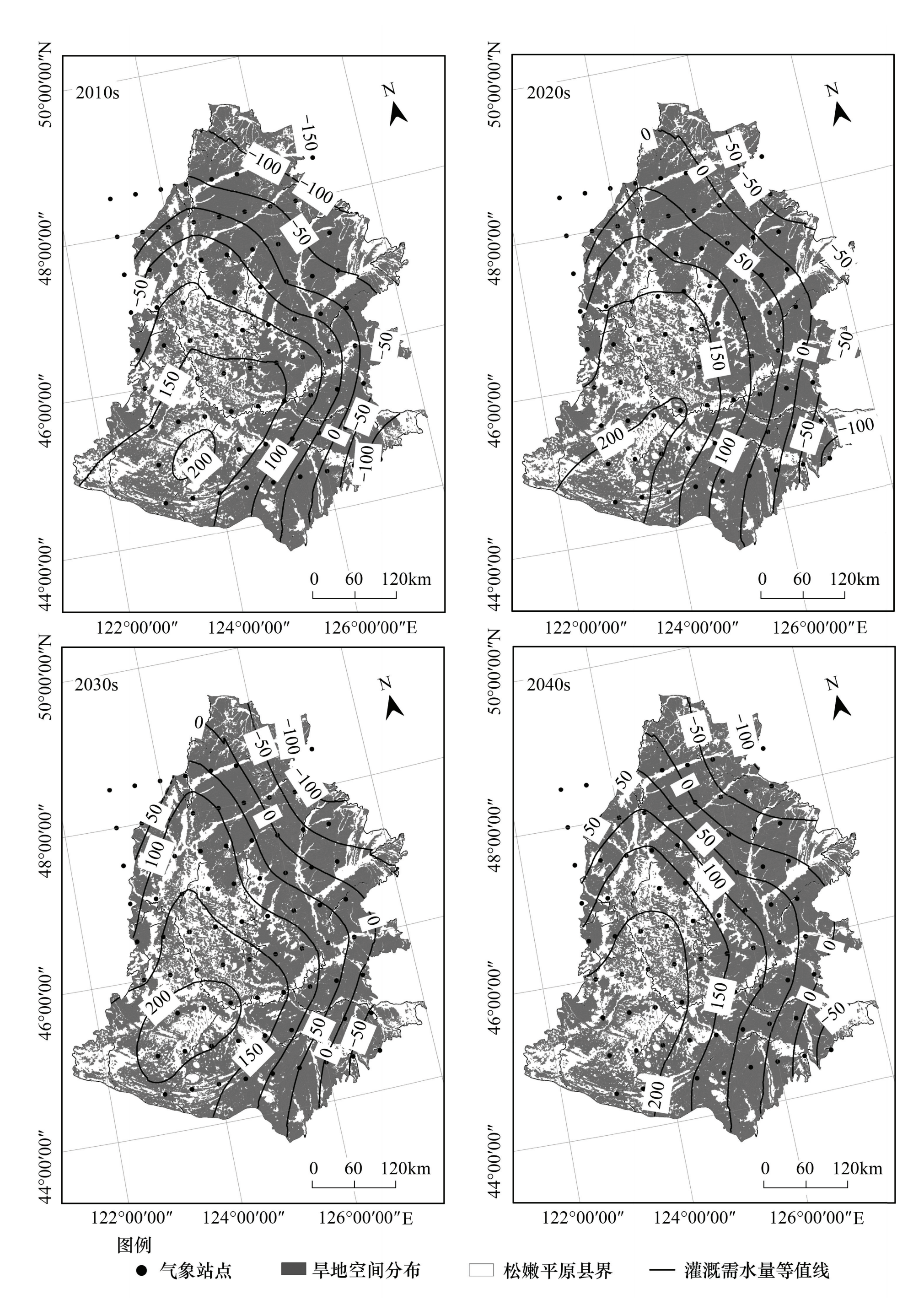


图 5 未来 40 a 玉米全生育期灌溉需水量空间变化

Fig.5 Spatial variation of maize irrigation water requirement during the whole growth period in the future 40 years

果如图 9 所示。未来 40 年,气候变化对松嫩平原玉米 L_{mid} 时段灌溉需水量空间变化影响较大,主要是 L_{mid} 时段松嫩平原玉米需水量增加较多。在空间变化上,L_{mid} 时段灌溉需水量等值线沿西南—东北方向递减;同一灌溉需水量等值线北移,与 2010s 相比,2040s 灌溉需水量临界等势线(灌溉需水量为 0 的等势线)北移 55.2 km。在时间变化上,L_{mid} 时段灌溉需水量随年代增加变化不显著趋势;2020s 和 2030s 玉米灌溉需水量为 0—60 mm,稍高于 2010s 和 2040s。

2.6 气候变化对松嫩平原玉米水分需求贡献率

分县统计黑龙江省和吉林省农业统计年鉴(2001—2009)玉米种植面积数据,2000s 年均种植面积为

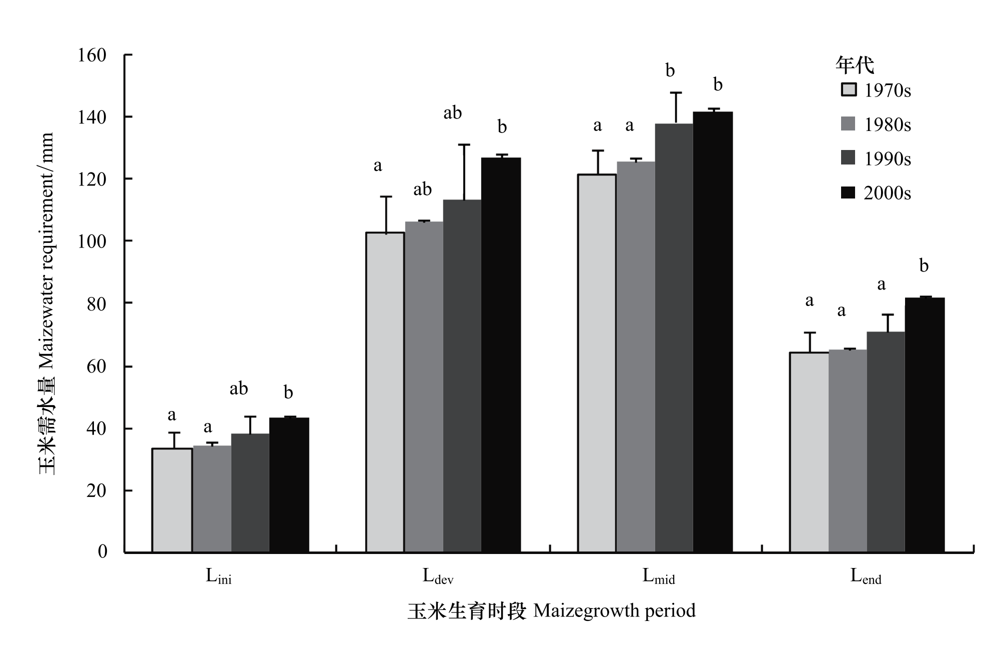


图 6　过去 40 a 玉米不同生育时段需水量时间变化

Fig.6　Temporal variation of maize water requirement during different growth period in the past 40 years

339.4×10[4] hm[2],占松嫩平原旱地面积(1058.1×10[4] hm[2])的 32.08%。由于土地利用图上无法分辨旱地作物种类,因此在估算作物需水量及灌溉需水量时,按照 2000s 玉米种植面积比例估算其他年代玉米种植面积,同时假设未来玉米种植面积与 2000s 相同。松嫩平原不同年代玉米灌溉需水量计算结果见表 3。过去 40 年,玉米需水量随着气候变化增加;由于年代降雨量分配不均,1980s 降雨量能够满足玉米生育期需水量要求,故不需要灌溉,其余年代均需要灌溉。1980s 之前,大量的湿地、草地、林地被开垦为农田种植粮食作物,之后为保护湿地与草地,开始退耕还湿、还林、还草,旱地面积减少;1990s 之后,由于粮食增产工程的实施,大量的湿地草地又被开垦为农田,旱地面积再次增加。2000s 玉米种植面积比 1970s 面积增加 3.1%,而玉米灌溉需水量增加 366.7%。气候变化情景对玉米需水量的贡献率为波动上升,与 1970s 相比,在不考虑玉米新品种及新栽培技术的应用情况下,2000s 气候变化对玉米需水量的贡献率为 22.1%,2040s 气候变化对玉米需水量的贡献率为 38.3%。气候变化将增加玉米水分需求,在不考虑玉米新品种及新栽培技术的应用情况下,与 1970s 相比,2000s 气候变暖将增加 6.8×10[8] m[3]灌溉水量,2040s 气候变暖将增加 12.6×10[8] m[3]灌溉水量。

表 3　气候变化对松嫩平原玉米需水量贡献率

Table 3　Contribution rate of climate change to maize water requirement in Songnen Plain

年代 Decade	旱地面积 Area/ (×10^4 hm^2)	玉米面积 Area/ (×10^4 hm^2)	全生育期 Whole growth period			与 1970s 相比 Compared with 1970s	
			需水量 WR /mm	灌溉需水量 IWR /mm	灌溉需水量 IWR/ (×10^8 m^3)	贡献率 CRCC /%	增加灌溉需水量 IWR_{cc}/ (×10^8 m^3)
1970s	1026.6	329.3	322.8	20.1	6.6	0.0	0.0
1980s	894.7	287.0	331.4	0.0	0.0	2.7	0.0
1990s	859.1	275.6	361.3	10.4	2.9	11.9	0.3
2000s	1058.1	339.4	394.1	90.7	30.8	22.1	6.8
2010s	1058.1	339.4	378.1	53.3	18.1	17.1	3.1
2020s	1058.1	339.4	408.1	85.3	29.0	26.4	7.7
2030s	1058.1	339.4	422.2	81.2	27.6	30.8	8.5
2040s	1058.1	339.4	446.5	97.0	32.9	38.3	12.6

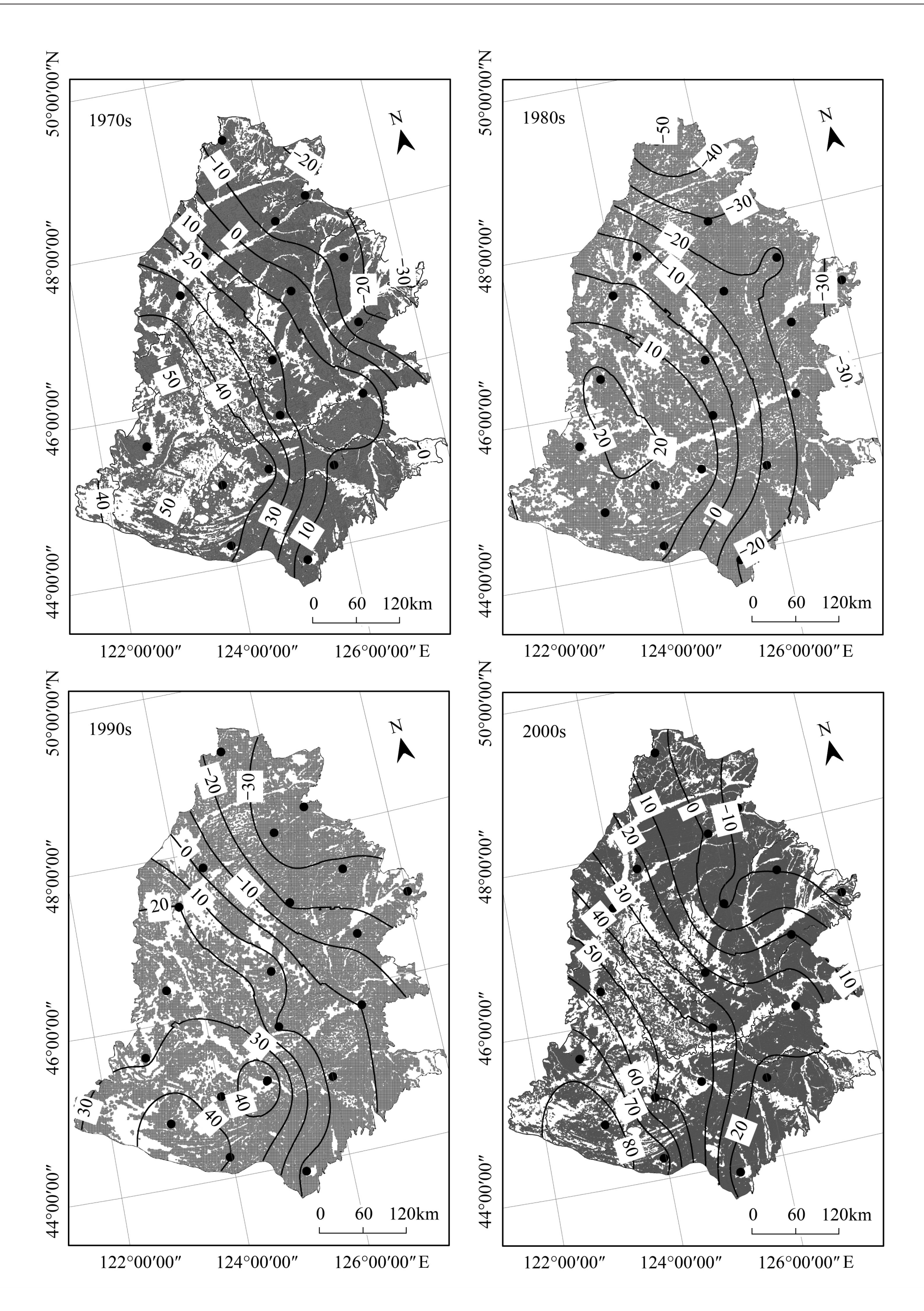


图 7 过去 40 a 玉米 L_{mid} 时段灌溉需水量空间变化

Fig.7 Spatial variation of maize irrigation water requirement during L_{mid} period in the past 40 years

3 讨论

区域气候模式提供的气候变化情景，一般提供温度与降雨量 2 个参数。学者们多采用 Hargreaves 模型计算气候变化情景下作物潜在蒸散量[32-33]，该模型需要太阳辐射、平均温度、最低温度、最高温度 4 个变量。由于区域气候模式提供的气候变化情景是在假定的太阳辐射强度下预测区域未来气象要素变化量，太阳辐射本身就是一个自变量，如果用太阳辐射估算未来气候情景下潜在蒸散，将增加其估算误差。此外，Hargreaves 模型所用参数少于 P-M 模型，其潜在作物蒸散量精度也低于 P-M 模型。本研究中，首次引入一种估算气候变化

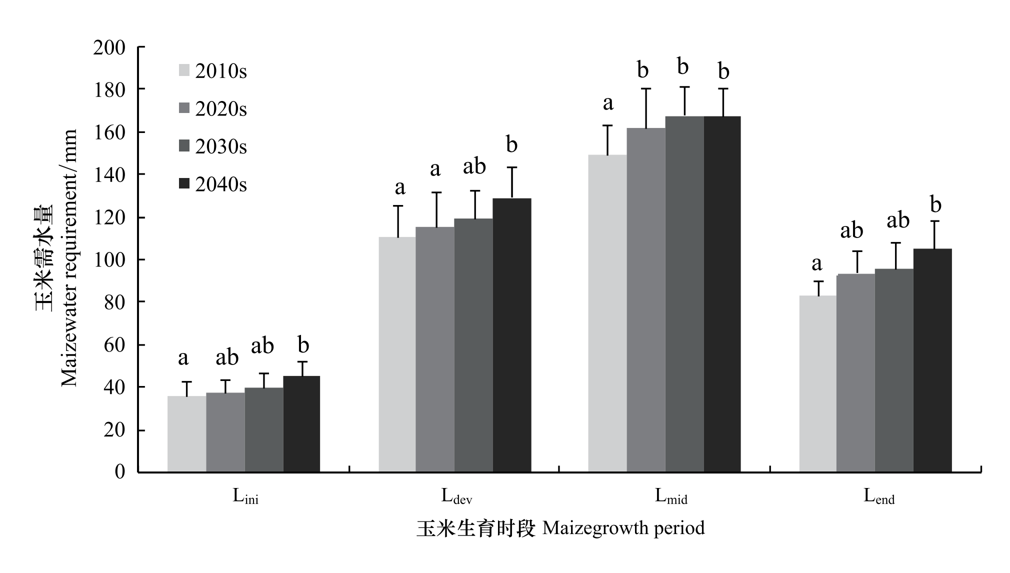


图 8　未来 40 a 玉米不同生育时段灌溉需水量时间变化

Fig.8　Temporal variation of maize irrigation water requirement during different growth period in the future 40 years

情景下作物潜在蒸散量方法。即先采用温度变量模型 McCloud 模型[29]估算历史时期作物潜在蒸散量,同时采用 P-M 模型估算历史时期潜在蒸散量,建立 2 个模型之间的线性数量模型;再采用 McCloud 模型估算气候变化情景下作物潜在蒸散量,利用之前建立的线性数量模型换算成 P-M 模型估算潜在蒸散量。该方法估算的作物潜在蒸散量精度较高,能够作为一种估算气候变化情景下的潜在蒸散量方法。

本研究中应用水量平衡模型估算作物灌溉需水量,引入有效降雨量替代降雨量数据。采用的有效降雨量模型源自美国美国农业部水土保持司推荐的方法。目前计算有效降雨量的常用方法有直接实地监测技术、经验方法和土壤水量平衡法[31]。Patwardhan 等[30]提出了基于土壤水量平衡模型的两种有效降雨量计算方法及适用条件;马建琴等[34]根据田间水量平衡原理建立了作物在线实时灌溉模型,提出了采用经验的降雨利用系数法计算有效雨量;刘战东等[35]对旱作物有效降雨量计算模式进行了研究,通过计算结果的可靠性和适应性对比分析,发现不同模式在相同条件下模拟计算的结果存在明显的差异。中国东北松嫩平原过去 40 年(1970—2009)作物生长季节(5—9 月)月均降雨量为 81.5 mm,与该方法引入的降雨常数 125 差别较大,将使得估算的有效降雨量与真实值差异较大,从而影响估算的灌溉需水量精度。对非充分实时灌溉来讲,有效降雨量是制定作物灌溉制度、灌溉用水管理的一个重要影响因素。因此,有必要通过田间试验和室内模拟实验构建适合中国区域的有效降雨量估算模型,这也将是今后研究作物灌溉需水量研究的一个重要方向。

作物不同生长阶段对水分需求不一样,关键需水期缺水将导致减产甚至绝收,研究作物不同生育时段需水规律能够减少或减轻这种不利影响。本研究在估算作物灌溉需水量时,没有考虑降雨的季节分配不均,因而得到的灌溉需水量值比实际值偏低。同时,本研究中假定作物品种特性和生育期不变,仅从作物潜在蒸散量和降雨量 2 方面考虑气候变化引起的作物需水量改变及其对水分供需的影响。事实上,影响作物水分供需变化的因子十分复杂,如果能结合机理性强的作物生长模型将会更好地揭示这一影响过程。另外,温度升高也会引起作物生育期的改变,从而导致作物水分盈亏程度可能稍有变化。但是确定大范围作物生育期的改变需要多点多年逐日气象资料、多年作物生育期观测资料和具有普适性的作物生长模式等,目前还存在一定难度,这些都将有待于今后进一步讨论和研究。

4　结论

本文通过分析气候变化背景下松嫩平原玉米需水规律和灌溉需水量时空分布规律,得到如下结论:

(1) 气候变化(温度和降水量)对松嫩平原玉米需水量和灌溉需水量空间分布产生影响。历史时期和气候变化情景下,松嫩平原玉米全生育期和 L_{mid} 时段灌溉需水量等值线沿西南—东北方向递减,其中全生育期

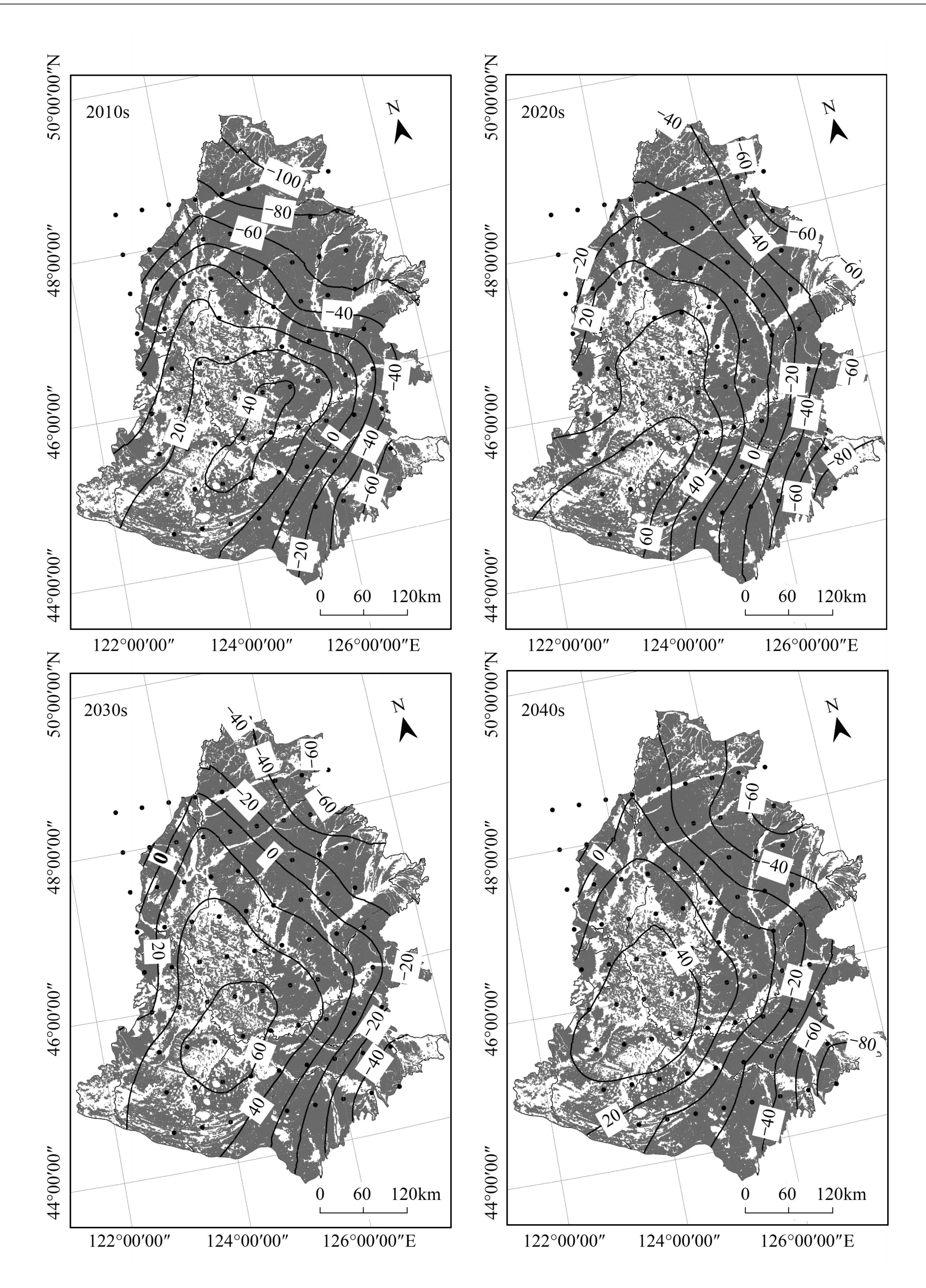


图 9 未来 40 a 玉米 L_{mid} 时段灌溉需水量空间变化

Fig.9 Spatial variation of maize irrigation water requirement during L_{mid} period in the future 40 years

和 L_{mid} 时段 2000s 灌溉需水量临界等势线(灌溉需水量为 0 的等势线)分别比 1970s 北移 70.2 km 和 53.4 km,全生育期和 L_{mid} 时段 2040s 灌溉需水量临界等势线分别比 2010s 北移 30.9 km 和 55.2 km。

(2) 历史时期和气候变化情景下玉米全生育期灌溉需水量随年代呈波动增加趋势,分别以 29.1 mm/(10a)和 17.5 mm/(10a)速度增加。

(3) 气候变化情景对玉米需水量的贡献率为波动上升,与 1970s 相比,2000s 气候变化对玉米需水量的贡献率为 22.1%,增加 6.8 亿 m^3 灌溉水量;2040s 气候变化对玉米需水量的贡献率为 38.3%,增加 12.6 亿 m^3 灌溉水量。

致谢:感谢国家气候中心提供的中国区域未来气候变化模拟结果。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis//Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L, eds. Contribution of Working Group Ⅰ to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 996-996.

[2] 谢立勇, 李悦, 钱凤魁, 赵洪亮, 韩雪, 林而达. 粮食生产系统对气候变化的响应-敏感性与脆弱性. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(5): 25-30.

[3] 于赢东, 杨志勇, 刘永攀, 秦大庸, 刘家宏. 变化环境下海河流域降水演变研究综述. 水文, 2010, 30(4): 32-35.

[4] 王红丽, 张绪成, 魏胜文. 气候变化对西北半干旱区旱作农业的影响及解决途径. 农业资源与环境学报, 2015, 32(6): 517-524.

[5] 肖国举, 张强, 李裕, 张峰举, 王润元, 罗成科. 气候变暖对宁夏引黄灌区土壤盐分及其灌水量的影响. 农业工程学报, 2010, 26(6): 7-13.

[6] 袁晓玉. 浙江省气候变化特征及自然灾害时空分布的统计分析[D]. 南京: 南京气象学院, 2002.

[7] Charlton M B, Arnell N W. Adapting to climate change impacts on water resources in England-an assessment of draft Water Resources Management Plans. Global Environmental Change, 2011, 21(1): 238-248.

[8] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 罗那那, Rasulov H. 石河子地区冬小麦生育期需水量变化特征及其气候成因. 水土保持通报, 2016, 36(1): 69-74.

[9] Molua E L. An empirical assessment of the impact of climate change on smallholder agriculture in Cameroon. Global and Planetary Change, 2009, 67(3/4): 205-208.

[10] Southworth J, Randolph J C, Habeck M, Doering O C, Pfeifer R A, Rao D G, Johnston J J. Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the midwestern United States. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000, 82(1/3): 139-158.

[11] 江敏, 石春林, 薛昌颖, 金之庆. A2 和 B2 排放情景下气候变化对福建省水稻生产的阶段性影响. 气象与环境科学, 2015, 38(4): 38-46.

[12] Elgaali E, Garcia L A, Ojima D S. High resolution modeling of the regional impacts of climate change on irrigation water demand. Climatic Change, 2007, 84(3/4): 441-461.

[13] Thomas A. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China. Global and Planetary Change, 2008, 60(3/4): 306-326.

[14] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 丛振涛. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6-12.

[15] 黄志刚, 王小立, 肖烨, 杨飞, 王晨溪. 气候变化对松嫩平原水稻灌溉需水量的影响. 应用生态学报, 2015, 26(1): 260-268.

[16] 韩宇平, 王朋, 王富强. 气候变化下淮河区主要作物需水量变化特征. 灌溉排水学报, 2013, 32(5): 114-117.

[17] Yano T, Aydin M, Haraguchi T. Impact of climate change on irrigation demand and crop growth in a Mediterranean environment of Turkey. Sensors, 2007, 7(10): 2297-2315.

[18] Díaz J A R, Weatherhead E K, Knox J W, Camacho E. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. Regional Environmental Change, 2007, 7(3): 149-159.

[19] Fleischer A, Lichtman I, Mendelsohn R. Climate change, irrigation, and Israeli agriculture: will warming be harmful?. Ecological Economics, 2008, 65(3): 508-515.

[20] 李春强, 李保国, 洪克勤. 河北省近 35 年农作物需水量变化趋势分析. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 359-363.

[21] 刘园, 王颖, 杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素. 生态学报, 2010, 30(4): 923-932.

[22] 马洁华, 刘园, 杨晓光, 王文峰, 薛昌颖, 张晓煜. 全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势. 生态学报, 2010, 30(14): 3818-3827.

[23] 龚燚, 陆维松, 陶丽. 东北春夏季降水气温异常的时空分布以及与旱涝的关系. 南京气象学院学报, 2003, 26(3): 349-357.

[24] 姚作芳. 松嫩平原主要粮食作物结构布局对气候变化的响应及产量预测研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.

[25] Tao F L, Yokozawa M, Hayashi Y, Lin E D. Future climate change, the agricultural water cycle, and agricultural production in China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 95(1): 203-215.

[26] 高晓容. 东北地区玉米主要气象灾害风险评估研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.

[27] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United, 1998: 166-171.

[28] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United, 1998: 85-85.

[29] McCloud D E. Water requirements of field crops in Florida as influenced by climate. Proceedings Soil and crop Science Society of Florida, 1955, 15: 165-172.

[30] Patwardhan A S, Nieber J L, John E L. Effective rainfall estimation methods. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1990, 116(2): 182-193.

[31] Döll P, Siebert S. Global modeling of irrigation water requirements. Water Resources Research, 2002, 38(4): 8-1-8-10.

[32] Hargreaves G H, Samini Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96-99.

[33] Droogers P, Allen R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(1): 33-45.

[34] 马建琴, 何胜, 郝秀平. 作物实时灌溉预报中有效降雨量的计算方法. 人民黄河, 2015, 37(5): 138-142.

[35] 刘战东, 段爱旺, 肖俊夫, 刘祖贵. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展. 灌溉排水学报, 2007, 26(3): 27-30, 34-34.